

# REFORÇO DE ELEMENTOS DE BETÃO ARMADO COM RECURSO A LAMINADOS DE CFRP MULTIDIRECIONAIS

## **José Sena Cruz**

([jsena@civil.uminho.pt](mailto:jsena@civil.uminho.pt))

Professor Associado

ISISE – Departamento de Engenharia Civil

Universidade do Minho

## **Joaquim Barros**

([barros@civil.uminho.pt](mailto:barros@civil.uminho.pt))

Professor Catedrático

ISISE – Departamento de Engenharia Civil

Universidade do Minho

## **Mário Coelho**

([mcoelho@civil.uminho.pt](mailto:mcoelho@civil.uminho.pt))

Aluno de Doutoramento

ISISE – Departamento de Engenharia Civil

Universidade do Minho

## **Pedro Fernandes**

([pfernandes@civil.uminho.pt](mailto:pfernandes@civil.uminho.pt))

Aluno de Doutoramento

ISISE – Departamento de Engenharia Civil

Universidade do Minho

## **Patrícia Silva**

([patricia.silva@civil.uminho.pt](mailto:patricia.silva@civil.uminho.pt))

Investigadora

ISISE – Departamento de Engenharia Civil

Universidade do Minho

## **RESUMO**

A aplicação de polímeros reforçados com fibras (*Fiber Reinforced Polymers* – FRP) no reforço de estruturas de betão armado (BA) tem sido realizada, essencialmente, com recurso às técnicas de colagem externa de mantas ou faixas de laminado e de inserção de laminados ou varões no betão de recobrimento.

No âmbito do projeto de investigação em que este trabalho se insere pretendeu-se avaliar as potencialidades de uma técnica de reforço que consiste em, simultaneamente, colar e ancorar laminados multidirecionais de fibras de carbono (*Multidirectional Laminate of Carbon Fibre Reinforced Polymers* – MDL-CFRP) na superfície dos elementos de BA a reforçar (*Mechanically Fastened and Externally Bonded Reinforcement* – MF-EBR). No presente trabalho apresentam-se os principais resultados experimentais obtidos no referido projeto de investigação.

## **1. INTRODUÇÃO**

A aplicação de FRP's no reforço de estruturas de BA tem vindo a merecer cada vez maior aceitação no seio da comunidade da Engenharia Civil, existindo já sistemas de reforço “tipo” com materiais e técnicas bem definidos.

Propriedades como baixo peso, elevado rácio rigidez/peso, imunidade à corrosão, grande variedade de tamanhos e formatos disponíveis, e ainda o decréscimo dos custos de fabrico, são algumas das razões que justificam a crescente utilização deste tipo de materiais.

Os FRP's têm vindo a ser aplicados em estruturas de BA, principalmente, com recurso a duas técnicas de reforço [1]: a colagem externa de mantas ou faixas de laminado (*Externally Bonded*

*Reinforcement* – EBR) ou a inserção de laminados ou varões no betão de recobrimento (*Near-Surface Mounted* – NSM) do elemento de BA a reforçar.

Vários estudos têm demonstrado a ocorrência frequente de modos de rotura frágeis, nomeadamente, destacamento prematuro do FRP, no caso da técnica EBR, e desintegração do betão de recobrimento, no caso da técnica NSM. Recentemente, surgiu uma técnica de reforço alternativa às anteriores, que recorre a laminados multidirecionais híbridos com fibras de vidro e de carbono, apenas ancorados com parafusos metálicos à superfície do elemento de BA a reforçar (*Mechanically Fastened* – MF-FRP) [2]. A principal vantagem desta técnica de reforço está associada ao facto de o sistema de ancoragem, sendo distribuído ao longo do reforço de FRP, permitir o desenvolvimento de tensões mais elevadas em toda a extensão do mesmo.

Tendo por base as técnicas EBR e MF-FRP, no âmbito do projeto a que este trabalho se refere, propôs-se uma técnica de reforço com FRP's que consiste em, simultaneamente, colar e aparafusar MDL-CFRP no elemento de BA a reforçar (MF-EBR). Esta técnica pretende associar os benefícios derivados das ancoragens da técnica MF-FRP com as vantagens da colagem externa da EBR. Além disso, as ancoragens são pré-esforçadas e o laminado multidirecional utilizado é exclusivamente composto por fibras de carbono para apresentar elevados níveis de eficácia.

O projeto tinha como objetivo fundamental dar um contributo no conhecimento da reparação e reforço à ação sísmica de nós de pórtico de BA com recurso a MDL-CFRP. Nesse contexto, foram definidas as seguintes tarefas principais:

- Desenvolvimento e caracterização de um laminado multidirecional de CFRP que satisfizesse as necessidades do projeto;
- Caracterização do comportamento da ligação entre o MDL-CFRP e o betão;
- Avaliação da eficiência do reforço de estruturas de BA com MDL-CFRP recorrendo à técnica MF-EBR.

Na presente comunicação, as tarefas acima referidas são apresentadas e os principais resultados obtidos são destacados.

## **2. CAMPANHAS EXPERIMENTAIS**

### **2.1 Desenvolvimento e caracterização do MDL-CFRP**

Devido à especificidade/novidade do material em causa, não foi possível encontrar MDL-CFRP no mercado. Na impossibilidade de se adquirir um produto acabado, houve necessidade de o dimensionar, produzir e validar.

Tendo em consideração as várias condicionantes existentes (tipo de matéria prima, métodos de produção disponíveis, propriedades mecânicas mínimas requeridas, entre outros) optou-se pela configuração de empilhamento quási-isotrópica apresentada na Fig. 1 a. Assim, o MDL-CFRP produzido era constituído por duas camadas de pré-impregnado unidirecional de carbono/epóxi (SEAL, TEXIPREG® HS 160 REM) orientadas a  $\pm 45^\circ$  em ambas as faces de uma camada de laminado unidirecional de carbono/epóxi (S&P, CFK® 150/2000) orientada a  $0^\circ$ .

A produção do MDL-CFRP ficou a cargo do INEGI (Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial da Universidade do Porto). Este foi produzido com recurso a uma máquina de autoclave, estando a sequência de empilhamento dos seus elementos representada na Fig. 1 b. Numa primeira fase foi produzido MDL-CFRP em quantidade suficiente para a sua caracterização geométrica e mecânica [3]. Foram realizados ensaios para avaliação das propriedades à tração a  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , resistência ao esmagamento e à flexão a  $0^\circ$ .

Da análise dos resultados foi possível concluir que:

- (i) a resistência ao esmagamento aumenta com o aumento do pré-esforço aplicado nos parafusos;
- (ii) este aumento tem um valor máximo a partir do qual não se verificam acréscimos de resistência com o acréscimo de pré-esforço. Pelo contrário, verifica-se que acima de determinado valor de pré-esforço o MDL-CFRP pode ficar danificado na zona do parafuso, resultando uma zona de fragilidade que conduz a menores valores de resistência ao esmagamento;
- (iii) em todos os ensaios efetuados ocorreu um modo de rotura misto com corte e esmagamento.

Na Tabela 1 incluem-se as principais propriedades obtidas da caracterização do MDL-CFRP. Nesta tabela também estão incluídos valores para as mesmas propriedades referentes a um laminado multidirecional híbrido comercial, constituído por fibras de vidro e carbono (SAFSTRIP®).

Comparando o desempenho de ambos os materiais, é possível concluir que o presente projeto permitiu desenvolver um laminado exclusivamente feito com fibras de carbono e com características mecânicas significativamente superiores aos laminados comerciais disponíveis.

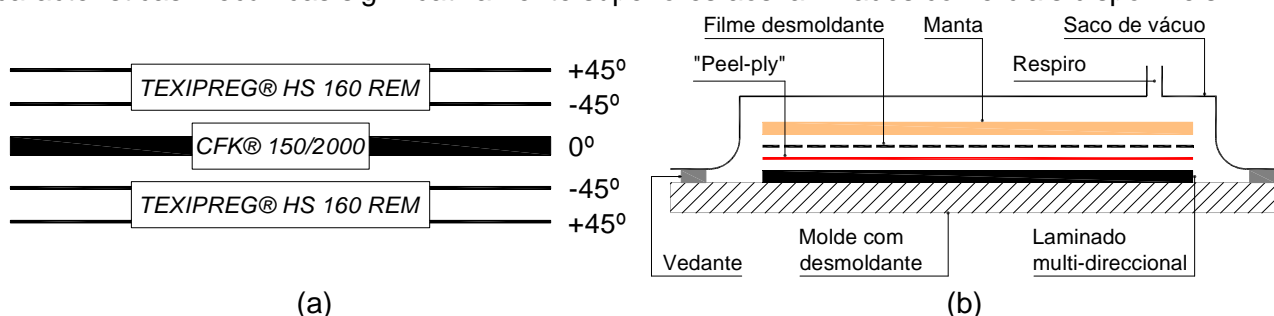


Fig. 1 – Produção do MDL-CFRP: (a) Sequência de empilhamento e materiais utilizados (secção transversal); (b) Configuração de produção utilizada.

Tabela 1 - Principais propriedades obtidas na caracterização do MDL-CFRP.

Laminado	$t_f$ [mm]	$f_{fu}$ [MPa]	$E_f$ [GPa]	$\varepsilon_{fu}$ [%]	$f_{f,br}$ [MPa]	
					$T_0$	$T_1$
MDL-CFRP	2.07	1866 (5.1%)	118 (2.8%)	1.58 (5.1%)	316.4 (11.8%)	604.4 (5.8%)
SAFSTRIP	3.18	852	62.2	n/a	180	279

Nota 1:  $t_f$  – espessura;  $f_{fu}$  – resistência à tração;  $E_f$  – módulo de elasticidade;  $\varepsilon_{fu}$  – extensão ultima;  $f_{f,br}$  – resistência ao esmagamento;  $T_0$  – sem pré-esforço;  $T_1$  – com pré-esforço correspondente a um momento de aperto de 40 Nxm;  
Nota 2: os valores entre parêntesis são os correspondentes coeficientes de variação.

## 2.2 Caracterização do comportamento da ligação entre o MDL-FRP e o betão

A caracterização do comportamento da ligação entre o MDL-CFRP e o betão foi realizada através da execução de um extenso programa experimental de ensaios de arranque direto [4]. A seleção dos parâmetros a estudar foi efetuada com base em resultados existentes na bibliografia da especialidade (com especial incidência nas aplicações já realizadas ao nível da indústria aeroespacial e aeronáutica) e noutros parâmetros considerados cruciais no âmbito do projeto. Nesse contexto foram selecionadas as seguintes variáveis para análise: técnica de reforço (EBR, MF-FRP ou MF-EBR); quantidade (1, 2 ou 3) e diâmetro (M8 ou M10) das ancoragens; nível de pré-esforço a aplicar às ancoragens (0 ou 40 Nxm) e comprimento de amarração.

Na Fig. 2 apresenta-se, de forma esquemática, a configuração de ensaio adotada, bem como uma foto ilustrativa dos ensaios de arranque efetuados.

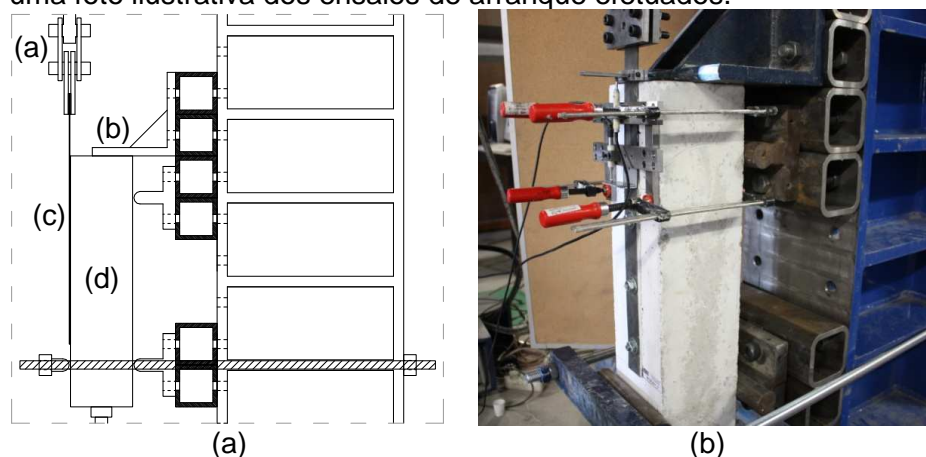


Fig. 2 – Ensaios de arranque direto: (a) Configuração de ensaio; (b) Foto de um ensaio. Legenda: (a) amarra rotulada; (b) apoio; (c) MDL-CFRP; (d) provete de BA.

A realização de programa experimental envolveu um total de 71 provetes reforçados com várias combinações pré-definidas dos parâmetros anteriormente referidos. Dos resultados experimentais obtidos foi possível extrair como principais conclusões que [4]:

- (i) a técnica mais efetiva foi a MF-EBR, dado que conduziu aos maiores valores de resistência;
- (ii) a força máxima de arranque aumenta com o número e o diâmetro das ancoragens;
- (iii) o acréscimo de força é maior quando é aplicado pré-esforço nas ancoragens;
- (iv) as relações força de arranque *versus* deslizamento são não lineares até ao pico de carga, sendo que, para os casos com ancoragens pré-esforçadas, se obteve uma resposta mais linear;
- (v) os modos de rotura típicos observados para os provetes MF-EBR foram o destacamento na interface adesivo/betão, destacamento na interface adesivo/MDL, delaminação do MDL e esmagamento do laminado ao nível das ancoragens.

### 2.3 Reforço de nós de pórtico com MDL-CFRP

Foram realizados dois programas de ensaios com o intuito de propor e avaliar a eficiência das técnicas de reforço aplicadas a nós de pórtico de BA submetidos a ações cíclicas. Contudo, neste trabalho apenas se apresenta um dos programas de ensaios efetuado.

Os nós estudados procuraram reproduzir situações reais. Foram utilizados protótipos à escala real, incluindo provetes com dano inicial resultante de um evento sísmico e utilizando materiais (betão de baixa resistência e armaduras lisas) e geometrias (viga forte – pilar fraco) idênticos àqueles que eram usados até ao final da década de 70. De facto, no contexto dos países do sul da Europa, são estas as estruturas que necessitam de maior intervenção de modo a mitigar o risco de colapso sísmico.

No primeiro programa de ensaios usou-se uma configuração de ensaio já existente, em que se procurou analisar o tipo de configuração de reforço e o efeito do nível de dano inicial na resposta final da estrutura [5]. Na Fig. 3 apresenta-se a configuração de ensaio adotada.

Após a aplicação de dano inicial, os nós foram reconstruídos, as fendas foram seladas e o reforço de MDL-CFRP foi aplicado. As duas soluções de reforço propostas encontram-se representadas esquematicamente na Fig. 4. Em função da localização do MDL-CFRP, as soluções de reforço foram designadas por direta ou indireta.

Na Fig. 5 apresenta-se um exemplo dos resultados obtidos para o protótipo com a solução de reforço direta e respetivo protótipo de referência.

Quando comparados com os nós não reforçados, foi possível obter um aumento de capacidade de carga até cerca de 35%. Neste caso o incremento de energia dissipada foi significativo. Muito interessante, também, foi a possibilidade de se repor a rigidez inicial do nó através da selagem das fendas e da reconstrução dos cantos. Esta técnica mostrou-se muito eficiente, sobretudo nos nós com armaduras lisas.

Os principais modos de rotura obtidos consistiram em fendas de flexão, esmagamento por compressão do betão nos cantos dos nós, destacamento do laminado na interface betão/adesivo e esmagamento do MDL-CFRP.

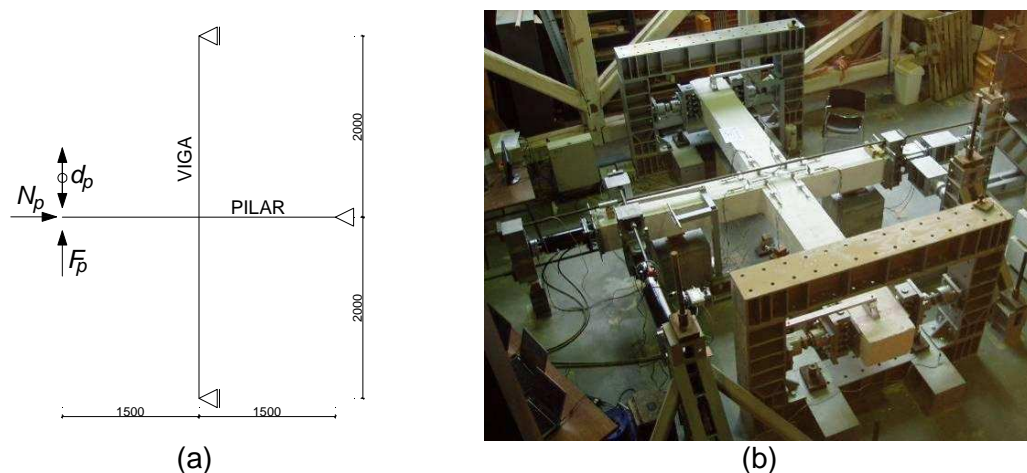


Fig. 3 – Configuração de ensaio dos nós interiores: (a) Esquema estrutural; (b) Foto de um ensaio.

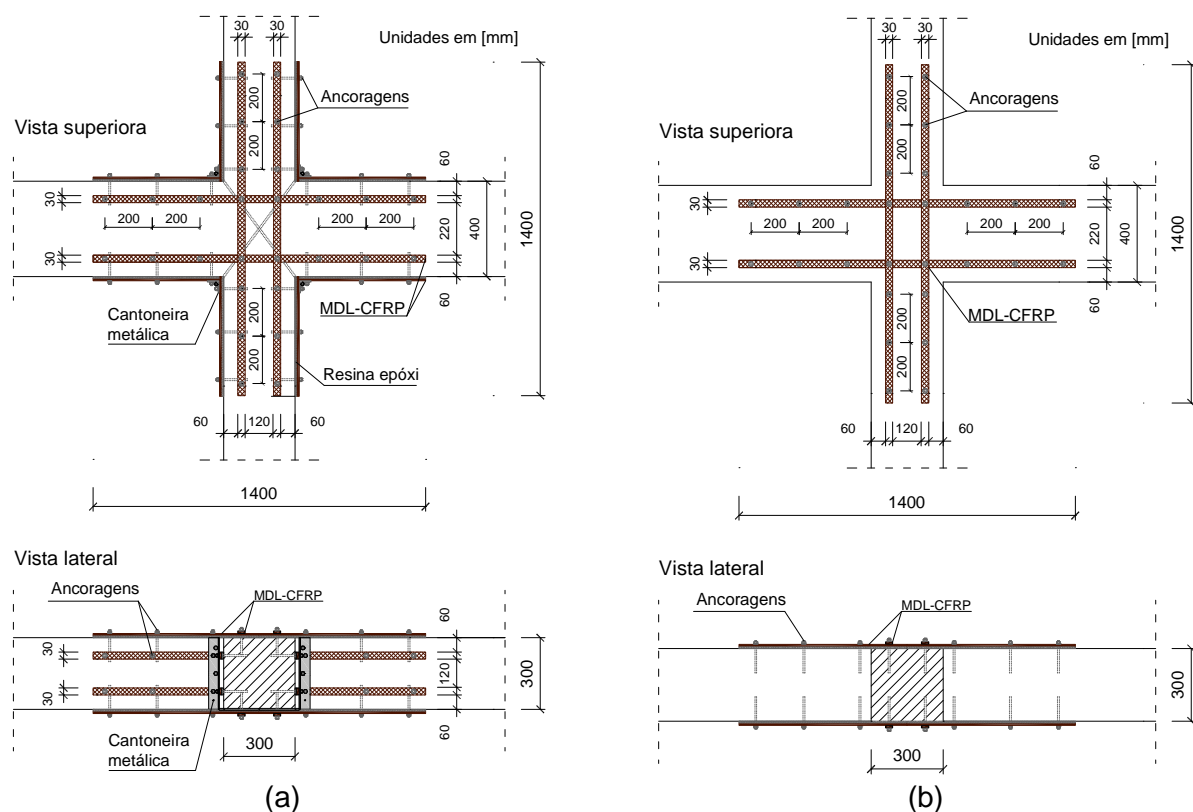


Fig. 4 – Reforço de nós interiores: (a) solução direta; (b) solução indireta.

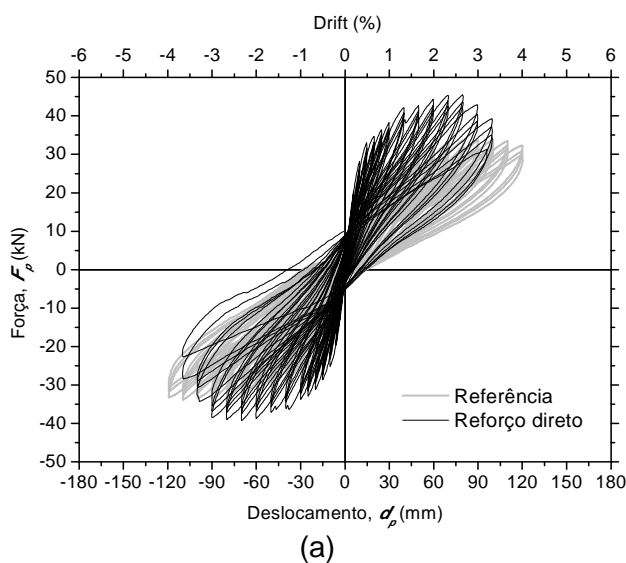


Fig. 5 – Nó com solução de reforço direto: (a) relação força versus deslocamento; (b) modo de rotura.

## 2.4 Reforço de vigas de BA

As potencialidades do MDL-CFRP foram também testadas no reforço à flexão de vigas. A Fig. 6 mostra a resposta obtida em termos de força *versus* deslocamento das vigas ensaiadas sob carregamento monotónico. A partir desta figura é possível constatar que a viga reforçada que maior carga atingiu foi a MF-EBR. Quando comparado com a viga de referência (REF), foi obtido um aumento na capacidade de carga de 37%, 87% e 86% para as vigas EBR, MF-EBR e NSM, respetivamente. No entanto, o aspeto mais favorável da técnica MF-EBR foi o nível de ductilidade (4.35), muito superior ao registado nas outras duas vigas reforçadas, EBR (1.80) e NSM (2.98).



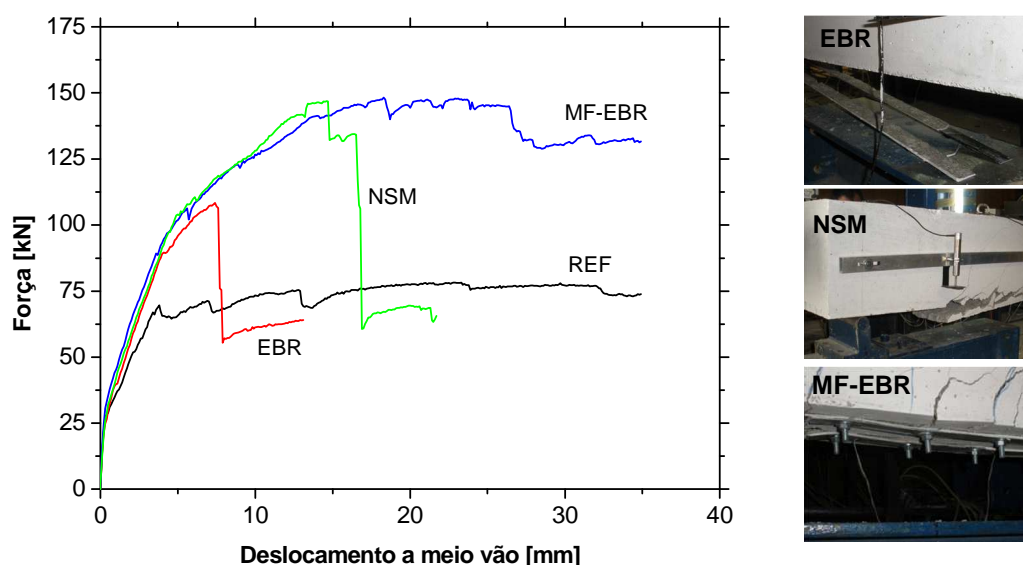


Fig. 6 – Resposta força *versus* deslocamento das vigas ensaiadas sob carregamento monotónico.

### 3. CONCLUSÕES

Na presente comunicação foi dada a conhecer a técnica de reforço MF-EBR. Esta consiste na aplicação de MDL-CFRP na superfície dos elementos a reforçar, através da colagem com epóxi em conjunto com a aplicação discreta de ancoragens mecânicas. Esta técnica revelou-se bastante promissora, apresentando vantagens quando comparada com o desempenho de técnicas de reforço mais utilizadas atualmente, abrindo assim caminho para uma solução alternativa que, em muitos casos, poderá ser a melhor solução de reforço.

O presente trabalho foi financiado pelos programas COMPETE e FEDER, projeto PTDC/ECM/74337/2006 da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia. Os autores manifestam os seus agradecimentos às empresas que gentilmente forneceram os materiais, nomeadamente, à S&P Clever Reinforcement Ibérica Lda., Hilti Portugal – Produtos e Serviços Lda., à SECIL, e à empresa TSwaterjet pelo corte dos laminados utilizando a tecnologia de jato de água. Todas as publicações desenvolvidas no âmbito deste projeto poderão ser consultadas em [www.sc.civil.uminho.pt](http://www.sc.civil.uminho.pt)

- [1] “Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures.” Report ACI 440.2R-08 by ACI Committee 440, American Concrete Institute (ACI), Farmington Hills, USA, 80 pp, 2008.
- [2] Bank, L. “Mechanically Fastened FRP (MF-FRP) Strips for Strengthening RC Structures – A Viable Alternative”, In: Proc of 2nd international conference on FRP composites in civil engineering: CICE, Adelaide, Australia, December 8–10, 2004, 12 pp.
- [3] Sena-Cruz, J.M.; Barros, J.A.O.; Carvalho, J.; Coelho, M. “Caracterização geométrica e mecânica de laminados multi-direccionais produzidos pelo INEGI.” Relatório no. 09-DEC/E-28, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães, 43 pp, 2009.
- [4] Coelho, M.; Fernandes, P.; Sena-Cruz, J.M.; Barros, J.A.O. “Comportamento da ligação entre laminados multi-direccionais de CFRP e o betão”, Relatório no. 11-DEC/E-15, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães, 74 pp, 2011.
- [5] Coelho, M.; Fernandes, P.; Melo, J.; Sena-Cruz, J.M.; Varum, H.; Barros, J.; Costa, A. (2012) “Seismic retrofit of RC beam-column joints using the MF-EBR strengthening technique.” Advanced Materials Research, Vols. 452-453, 1110-1115.
- [6] Coelho, M.; Fernandes, P.; Sena-Cruz, J.M.; Barros, J.A.O. (2011) “Reforço sísmico de nós de pórtico em betão armado com laminados multidireccionais de CFRP”, Relatório no. 11-DEC/E-32, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães, 74 pp.
- [7] Sena-Cruz, J.M.; Barros, J.A.O.; Coelho, M.R.; Silva, L. (2011) “Efficiency of different techniques in flexural strengthening of RC beams under monotonic and fatigue loading.” Construction & Building Materials, 29, 175–182.